

円形ヘリウムガス噴流に生じるサイドジェット

村松 旦典¹⁾, Mirko Gamba²⁾, Noel T. Clemens³⁾

1) 日本大学理工学部, 2) テキサス大学大学院, 3) テキサス大学工学部

Side Jets Generated at the Near Field of Round Helium Gas Jets

by

Akinori MURAMATSU, Mirko GAMBA, and Noel T. CLEMENS

ABSTRACT

Side jets, which are radial ejections of jet fluid, are formed in the near field of low-density jets, such as helium gas and hot air jets. Side jets enhance the mixing of fluids between the jet and the ambient fluid in the vicinity of the nozzle exit. It is essential to understand the formation mechanism of side jets in order to take advantage of side jets and control the enhanced mixing of a jet. Side jets in round helium gas jets were investigated using planar laser Mie scattering (PLMS) imaging, particle image velocimetry (PIV) and hot-film anemometry. It was found that the number and ejection directions of the side jets vary with Reynolds number. Regions of large curvature at the contour of the jet column become the initiation points of the side jets. The velocity in the potential core fluctuates periodically. The movement of the high-speed fluid lump in the jet column is related to the formation of side jets. The side jet is not ejected uniformly; rather, it is discharged strongly in the braid region. The power spectra of the centerline velocity fluctuation show a complex system of subharmonic and superharmonic of a fundamental component.

1. はじめに

ヘリウムガスや加熱した空気を大気中に噴出した場合のように、噴出気体の密度が周囲気体の密度より小さい噴流の発達過程においてサイドジェット^{1)~7)}と呼ばれる、噴流の主流方向とは異なる方向への噴流流体の噴出現象が生じる。サイドジェットが形成されると、噴出気体はノズル出口近傍から周囲気体と混合する。サイドジェットが形成される条件や形成過程を知ることは、噴流による混合制御の観点からも重要である。

サイドジェットが生じるための条件は理論、実験および数値計算により検討されていて、主も重要なパラメータは噴出気体と周囲気体の密度比^{1)~4)}である。その臨界値は 0.6~0.7 の値が示されている。他に影響する因子は、ノズル出口で形成される噴流のせん断層が持つ運動量であり、噴出速度の大きさやその速度分布形状⁷⁾が関係する。Kyle ら⁴⁾は、噴出レイノルズ数は主要なパラメータではないとして、運動量厚さとノズルの出口直径の比の無次元数をパラメータとして提案している。しかし、低レイノルズ数領域での研究がなく、噴出レイノルズ数の依存性は良く分かっていない。

また、サイドジェットは噴流カラムの自励振動が原因となって形成されると説明されている^{1)~4)}。サイドジェットの具体的な形成メカニズムについても、いくつかの提案が示されている。Monkewitz ら¹⁾は、噴流カラムのせん断層で形成される渦輪の変形がサイドジェット形成のための重要な要因であるとした。その後、Brancher ら⁵⁾は直接数値シミュレーションの結果に基づき、渦輪の変形は重要ではなく、ブレード領域内で形成される縦渦対によってサイドジェットが形成されるメカニズムを提案している。また、圧力勾配下での密度勾配によって生じる baroclinic torque による渦度の生成が、サイドジェットの形成のために作用しているとも考えられている⁶⁾。しかしながら、これらの研究にもかかわらず、サイドジェットの形成メカニズムの詳細は未だにわかっていない。

本報告では、静止空気中に円形ノズルよりヘリウムガスを噴出したヘリウムガス噴流に生じるサイドジェットの性質や形成メカニズムを実験的に調べた。ヘリウムガスの空気に対する密度比は 0.138 で、密度比の臨界値（例えば 0.7³⁾）より十分に小さい。最初に、噴出レイノルズ数を変化させた場合のサイドジェットの形成への影響を調べるために、レーザシート光によるミー散乱 (PLMS) によって噴流の中心軸上

断面を可視化した。その結果、密度比が臨界値より小さくても、噴出レイノルズ数がある値以上にならないとサイドジェットは形成されないことが示される。サイドジェットが形成される下限の噴出レイノルズ数の場合には、噴流の渦構造の周期的な変化も遅く、形成されたサイドジェットは数秒間持続するので、サイドジェットの構造を観察するのには都合が良い。次に、このような場合について、PLMS により可視化された噴流断面の画像を高速度カメラで記録した。また、PIV により噴流の速度分布を、熱膜流速計を使用して噴流の速度の時間変化を測定した。これらの可視化および測定結果に基づいて、サイドジェットの形成過程について考察する。

2. 実験装置および方法

テキサス大学で、クロス・フロー中の乱流噴流火炎の研究に使われている実験装置⁸⁾を使用した。ノズルは出口直径 $D_0 = 6.35 \text{ mm}$ (1/4 インチ)、縮流比 144 の円形ノズルであり、ノズル出口での速度分布はトップハット形となる。ノズルは風洞測定部の底面にノズル出口面を一致させて取り付けられている。

噴出気体にはヘリウムガスを使用し、ノズルから風洞の測定部内の静止空気中（すなわち、クロス・フローの速度は 0 m/s である）に鉛直上方へ噴出した。噴出速度 U_0 は、 $Re = U_0 D_0 / v_0$ で定義される噴出レイノルズ数が 300~2500 となる 5.6 ~47.6 m/s である。ここで、 Re が 300~1500 の範囲では Re を 100 ずつ変え、 Re が 1500~2500 では 500 ずつ変えた。なお、 v_0 はヘリウムガスの動粘性係数である。

ヘリウムガスに散乱粒子として TSI 社の Six Jet Atomizer (Model 9306) によって微粒化したオリーブオイルを混入し、ダブルパル Nd:YAG レーザ (Spectra-Physics, PIV-400) を光源とする厚さ約 0.6 mm のシート光により可視化した。可視化された画像はデジタルカメラ (Kodak, Megaplus ES1.0) により記録した。さらに、高速度で可視化画像を記録するために、Q スイッチ・ダイオードレーザ励起パルス Nd:YAG レーザ (Coherent, Corona) と高速度デジタルビデオカメラ (Photron, Fastcam-ultra APX) を使用した。

PIV による測定では、噴流の周囲空気中にも散乱粒子が必要となるため、あらかじめフォグマシン (Rosco, Model 1600) で発生した微粒子を風洞内に一様に分布させてから、Six Jet Atomizer により微粒化したオリーブオイルを混入したヘリウムガスを噴出した。レーザ光源にはダブルパルス

Nd:YAG レーザ (Spectra-Physics, PIV-400) を 10Hz で動作させて使用し、デジタルカメラ (Kodak, Megaplus ES1.0) で画像を記録した。このときの 2 画像間の時間間隔は $15\mu\text{s}$ とした。画像から速度ベクトルなどを求める処理には、LaVision 社のソフトウェア DAVIS 7.2 を利用した。このとき、 16×16 ピクセルの検査領域をとり、オーバラップは 50% とした。誤速度ベクトルを除去するために、メディアンフィルタと内挿スキームを使用した。

最後に、直径 $50\mu\text{m}$ の円柱状の熱膜プローブ (TSI, Model 1210) を定温度型熱線風速計 (TSI, Model 1054B, 1052-2) に接続して、噴流中心軸上での速度の瞬時値の時系列データを得た。定温度型熱線風速計の出力は、12bit の A/D コンバータを介してソフトウェア LabVIEW を利用して、サンプリング周波数 20kHz で 100,000 点ずつ収録した。速度変動のパワースペクトルはソフトウェア MATLAB を利用して求めた。

3. 実験結果および考察

3. 1 サイドジェットのレイノルズ数による変化

噴出レイノルズ数 Re を変えて、噴流中心軸上の流れ方向の断面を PLMS により可視化した写真を、図 1 に示す。図 1 の写真的下端はノズルの出口面と一致させている。 Re が 300 では、噴流カラムのせん断層でのロールアップは生じず渦輪の形成は見られない。 Re が 400 では、渦輪の形成は見られるがサイドジェット（噴流流体の噴流カラムからの噴出）は生じない。 Re が 500 以上になると、図 1 の中に赤い矢印で示したサイドジェットが観察される。 Re が 500 では、噴流の分岐現象のような主流とは別の斜め上方へのヘリウムガスの噴出（サイドジェット）が観察される。 Re が 600 を越えると（例えば、図 1 に示された $Re=800$ の場合）、斜め上方方向だけでなく、主流に直行する方向への噴出も見られるようになる。 Re が 1000 以上になると、主流に直行する方向への噴出が増え、サイドジェットの発生頻度も大きくなるので、噴流はノズル出口近傍から大きく拡がる。また、 Re が増加すると渦輪間の間隔が短くなるので、サイドジェットはよりノズル近くから生じるようになる。

3. 2 サイドジェットの構造

Re が 800 以下の斜め上方へ噴出するサイドジェットを 1 分ほど観察すると、サイドジェットが形成される周方向の位置はランダムに変化するが、ノズルからの高さはほとんど変化していないことがわかる。また、形成されたサイドジェットは少なくとも数秒間は持続するので、サイドジェットの形成過程や構造を観察するには都合が良い。

図 2 に、サイドジェットが形成される下限である Re が 500 のヘリウムガス噴流について、噴流中心軸上の流れ方向の断面の可視化写真を 0.5 ms の間隔で示す。サイドジェットは渦輪の移動と関連して形成されているように見える。例えば、図 2 の右側のサイドジェットの噴出位置は上流から三つ目の渦輪であり、渦輪の流下とともに渦輪の上部から下部に移動し、上流から流下した次の渦輪に繋ぎかえられていく。図 2 では、サイドジェットの基部が渦輪の流下とともに次の渦輪へ繋ぎ変わる 1 周期分を示している。この過程を繰り返し、サイドジェットは維持される。この間、サイドジェットの噴出位置はほとんど変わらない。渦輪の上部から渦輪の中心（図 2 の 1, 2 および 6）まではサイドジェットの噴出が弱く、渦輪の下部のブレード領域（図 2 の 3, 4 および 5）で噴出が太く強まっているように見える。サイドジェットの噴出速度は主流に比べ遅く、周期的に変化している。図 2 の写真には写っていないが、このサイドジェットはその末端では浮

力により漂うようになり、噴流の主流にエントレインメントにより引き込まれている。

図 3 は噴流の流れ方向に直交する断面の可視化写真であり、 0.34 ms 間隔で示した。渦輪の移動に伴って噴流カラムの断面の大きさは周期的に大きく変化する⁹⁾。図 3 では、この断面の大きさが変化する 1 周期分を示している。最も断面が大きくなった場合と小さくなった場合での断面積の比は、図 3 (b) の $x = 6\text{ mm}$ の位置では約 2 となり、後述する速度の測定結果でもわかるように強い速度変動が誘起されている。

図 3 の $x = 3, 6\text{ mm}$ では噴流カラムの輪郭はほぼ円形を保っているが、 $x = 9\text{ mm}$ になると軸対称性が崩れ、オレンジ色の矢印で示されるように噴流カラムの輪郭に曲率が大きくなる場所が現れる。 $x = 12\text{ mm}$ では、その曲率の大きな場所がサイドジェットの基部と見られる突起状の形状になる。 $x = 15, 18$ および 21 mm では、3 方向にサイドジェットが形成されていることが明確に分かる。このとき、図 2 と同様に、サイドジェットの基部は渦輪が通過する（例えば、図 3 (e) の 3, 4）ときに細く、渦輪が周囲にないブレード領域が通過する（例えば、図 3 (e) の 6, 7）ときに太くなる。ここで、図 3 において渦輪を緑色の矢印で、ブレード領域を水色の矢印で表示している。後述する PIV の測定結果で示されるように、サイドジェットが太い場合にその速度が大きく、噴流カラムがブレード領域のときにサイドジェットは強く噴出されることになる。この実験結果は、Brancher ら⁵⁾が示したブレード領域での縦渦対によってサイドジェットが形成されたとした計算結果を裏付けるものと考えられる。また、図 3 (e) の 4, (f) の 4 および (g) の 4, 5 で見られるように、ブレード領域から流出した流体が変形した渦輪の上部を通って噴流カラムの外側へ流出している。

図 4 に PIV により測定された速度場を示す。図中の矢印が速度ベクトルを示し、速度の大きさを色分けして表示している。赤色が高速な領域を示す。図 4 では明確に右上部に形成された一つのサイドジェットを捕らえている。図 4 (a) と (b) はそれぞれサイドジェットの噴出が弱くなった場合と強くなった場合を示している。両者の時間間隔は 0.3 秒であり、同一のサイドジェットである。サイドジェットの速度は 6 m/s 未満であり、最大値で噴出速度 U_0 の 60% 程度の大きさである。

図 5 は、図 4 と同じ場合の渦度場と噴流の中心軸上での速度分布を示した図である。正の渦度を赤で、負の渦度を青で表している。図 5 の渦度分布により、渦輪の位置が明確にわかる。図 4 と 5 から、渦輪の移動と共に噴流カラム内を高速な流体塊が通過していく様子が分かる。図 4 (a), 図 5 (a) に示されるサイドジェットの基部が渦輪の位置にあるときに、図 2, 3 の可視化画像をもとにした考察と同じく、サイドジェットの基部は細く途切れそうになり、その噴出速度は低速になっている。このとき、渦輪のサイドジェットが生じている側では渦輪の構造は多少崩壊している。図 4 (b), 図 5 (b) に示されるように、高速な流体塊がサイドジェットの基部を通過する直前、すなわち、次の渦輪がサイドジェットの基部に到達する直前に、サイドジェットは強く噴出されている。このとき、サイドジェットの基部は渦輪と渦輪の間のブレード領域にある。噴流カラム内の高速な流体塊の周期的な移動、すなわち渦輪の移動がサイドジェットの形成と深く関わっているように考えられる。

図 4 で見られた周期的な高速な流体塊の移動は、噴流カラム内で非常に大きな周期的な速度変動を生じていることを示している。熱膜流速計により測定された噴流の中心軸上での速度の時間変化を図 6 に示す。 $x/D_0 = 2.5$ ぐらいまで、時間

平均速度は噴出速度の値を維持しているので、ここで示した測定値は全てポテンシャルコア内であり、ヘリウムガスの周囲空気との混合は無いと考えて、ガス濃度による補正は行っていない。速度の時間変化は音のうなりに似た波形をしている。図4に示した $x/D_0 = 0.5, 1.0, 2.0$ および 2.5 における乱れ度は、それぞれ $7.0, 13.3, 20.0$ および 15.0% であり、非常に大きな値を持っている。図6(c)に示した $x/D_0 = 2.0$ で速度変動の値はピークとなり、サイドジェットが形成され始める位置とほぼ一致している。

図7は図6(a), (c)で示した変動速度のパワースペクトルである。サイドジェットが形成される噴流のスペクトルは多数のピークを持つ。最大ピークの周波数 f は約 410Hz であり、噴流のせん断層の初期不安定の周波数である。無次元周波数 $St = f \cdot D_0 / U_0 = 0.27$ の値は別の実験⁹⁾による St の値ともほぼ一致している。スペクトルには基本周波数 f の $f/2$ のサブハーモニックと $2f, 3f$ などのスーパーハーモニックの成分が含まれている。

4.まとめ

ヘリウムガス噴流に形成されるサイドジェットについて、流れの可視化と速度の測定を行った。

(1) サイドジェットと噴出レイノルズ数の関係について調べた結果、サイドジェットが形成される下限のレイノルズ数があり、サイドジェットの噴出方向や頻度は噴出レイノルズ数とともに変化することがわかった。サイドジェットは、レイノルズ数が低いときには斜め上方への噴出し、レイノルズ数が大きくなると噴流の主流に直交する方向への噴出となる。サイドジェットの噴出頻度はレイノルズ数が大きくなるとともに増加する。

(2) サイドジェットが形成される下限の噴出レイノルズ数の噴流のサイドジェットについて調べた結果、以下のようなことがわかった。ポテンシャルコア内に生じる比較的強い周期的な速度変動に関連して、渦輪が変形し、曲率が大きくなつた点から噴流外側への噴流流体の流出が起こり、これがサイドジェットとなる。サイドジェットの噴出は一様ではな

く、渦輪の移動とともに、すなわち、噴流カラム内の高速な流体塊の移動とともに周期的に変化する。サイドジェットはブレード領域で強く、渦輪領域のときに弱まるが、サイドジェットの基部は流下してくる渦輪を次々と繋ぎ変わりながら、形成されたサイドジェットは維持される。このときのパワースペクトルは多数のピークを持ち、それは基本周波数とそのサブハーモニックや高調波によって構成されている。

参考文献

- 1) Monkewitz, P. A., Lehmann, B., Barsikow, B. and Bechert, D. W.: The spreading of self-excited hot jets by side jets, Phys. Fluids A, Vol.1, pp.446-448, (1989).
- 2) Sreenivasan, K. R., Raghu, S. and Kyle, D.: Absolute instability in variable density round jets, Exps Fluids, Vol. 7, pp. 309-317, (1989).
- 3) Monkewitz, P. A., Bechert, D.W., Barsikow, B. and Lehmann, B.: Self-excited oscillations and mixing in a heated round jet, J. Fluid Mech., Vol.213, pp.619-639, (1990).
- 4) Kyle, D. M. and Sreenivasan, K. R.: The instability and breakdown of a round variable-density jet, J. Fluid Mech., Vol.249, pp.619-664, (1993).
- 5) Branger, P., Chomaz, J. M. and Huerre, P.: Direct numerical simulation of round jets: Vortex induction and side jets, Phys. Fluids, Vol.6, pp.1768-1774, (1994).
- 6) Chassaing, P., Antonia, R. A., Anselmet, F., Joly, L. and Sarkar, S.: Variable density fluid turbulence, Kluwer academic publisher, (2002).
- 7) Ravier, S., Abid, M., Amielh, M., and Anselmet, F.: Direct numerical simulations of variable-density plane jets, J. Fluid Mech., Vol.546, pp.153-191, (2006).
- 8) Gamba, M., Clemens, N. T., and Ezekoye, O. A.: Strongly-forced turbulent non-premixed jet flames in cross-flow, AIAA2007-1418, (2007).
- 9) Muramatsu, A.: Potential core of round gas jets with different densities from the surroundings, Jets, Wake and Separated Flows, Mie Univ. Press, pp.419-424, (2005).

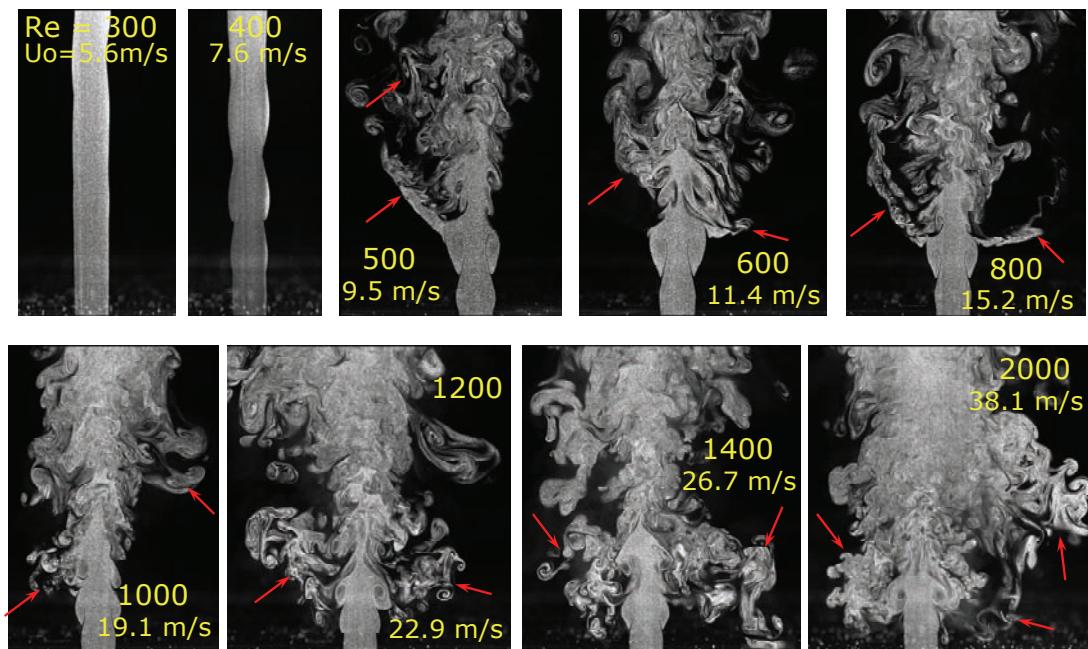
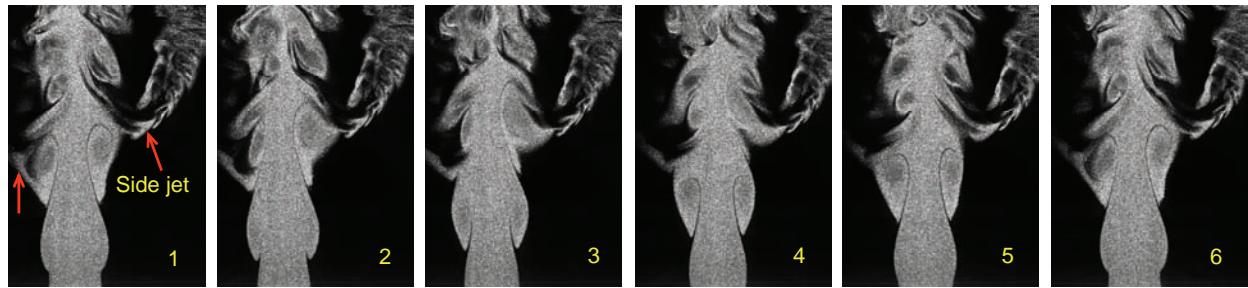
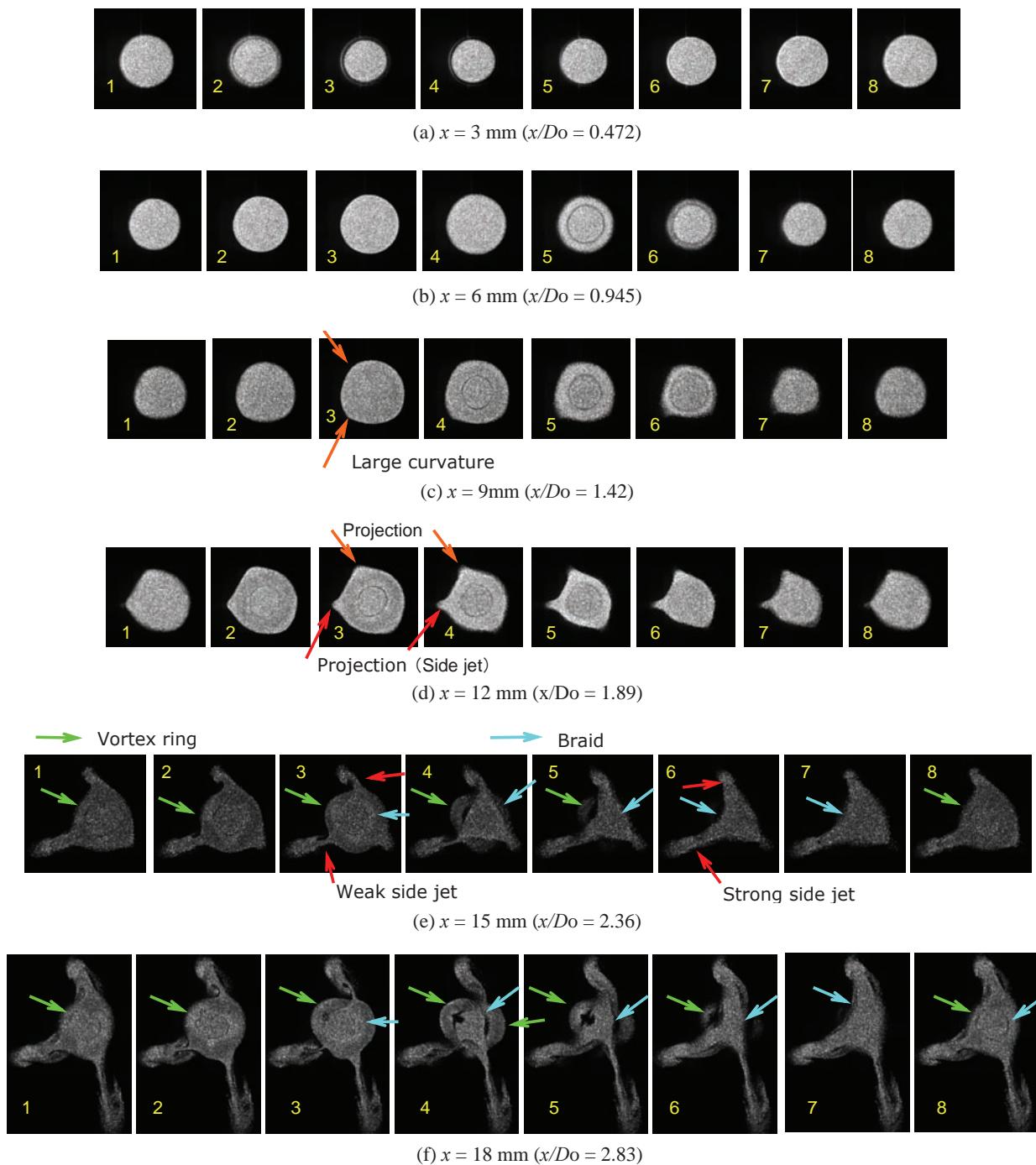


図1 様々なレイノルズ数でのヘリウムガス噴流中心軸上断面のPLMS画像

図2 ヘリウムガス噴流中心軸上断面のPLMSの連続画像 ($Re = 500$)図3 ヘリウムガス噴流の主流に直交する断面のPLMSの連続画像 ($Re = 500$)

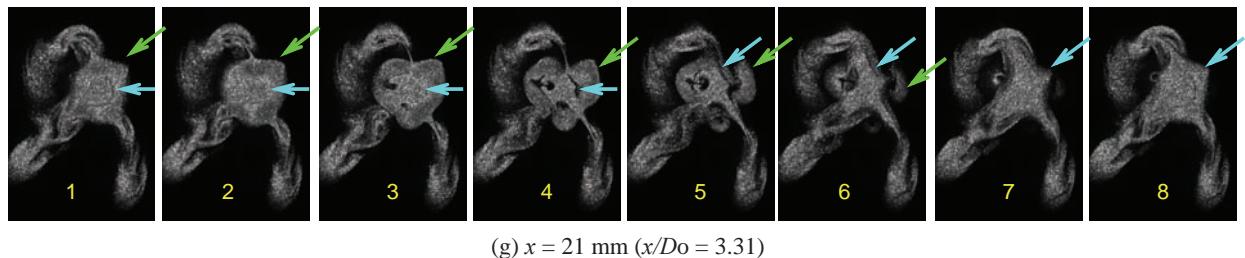


図3(続き) ヘリウムガス噴流の主流に直交する断面のPLMSの連続画像 ($Re = 500$)

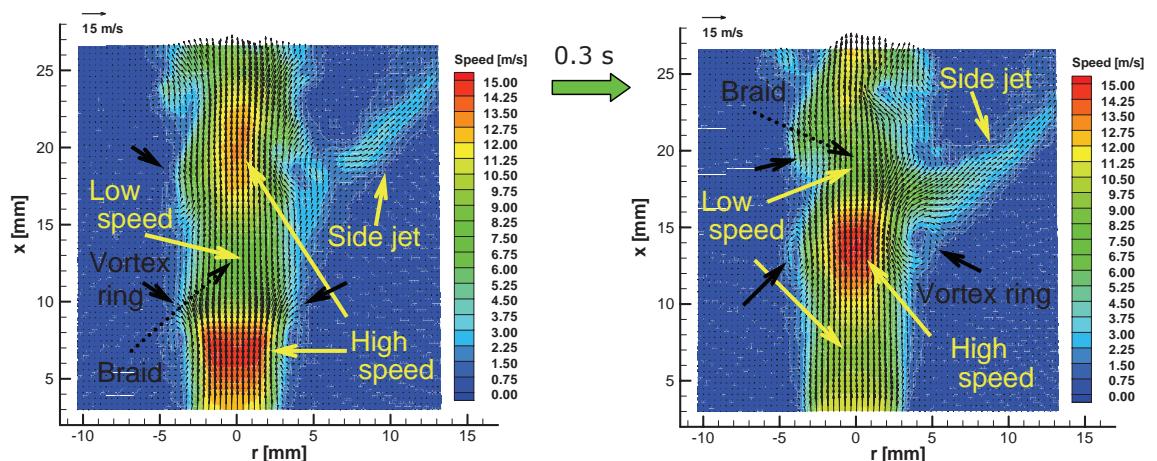


図4 PIVにより測定されたヘリウムガス噴流の速度場 ($Re = 500$)

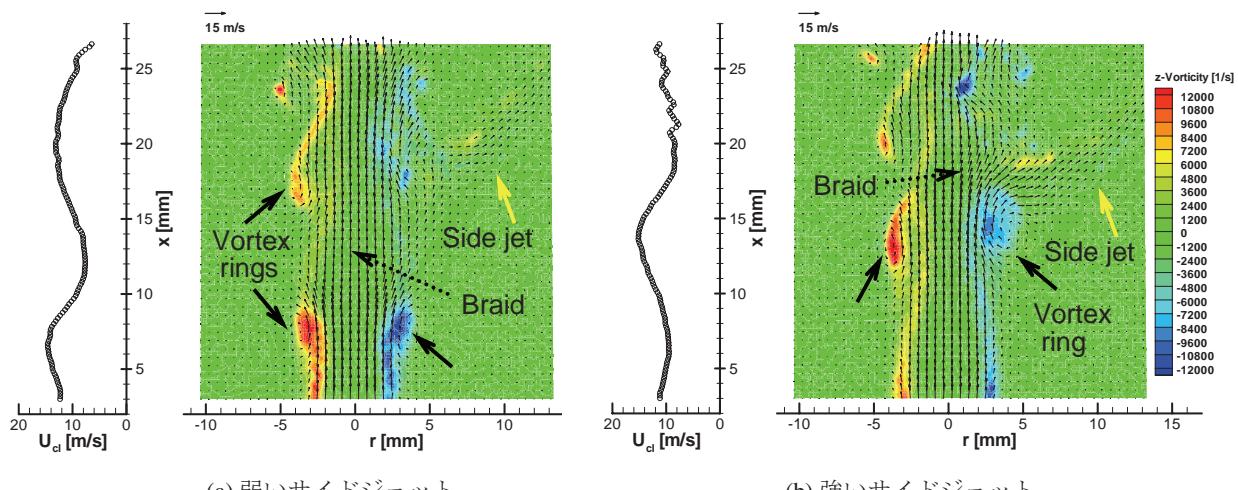
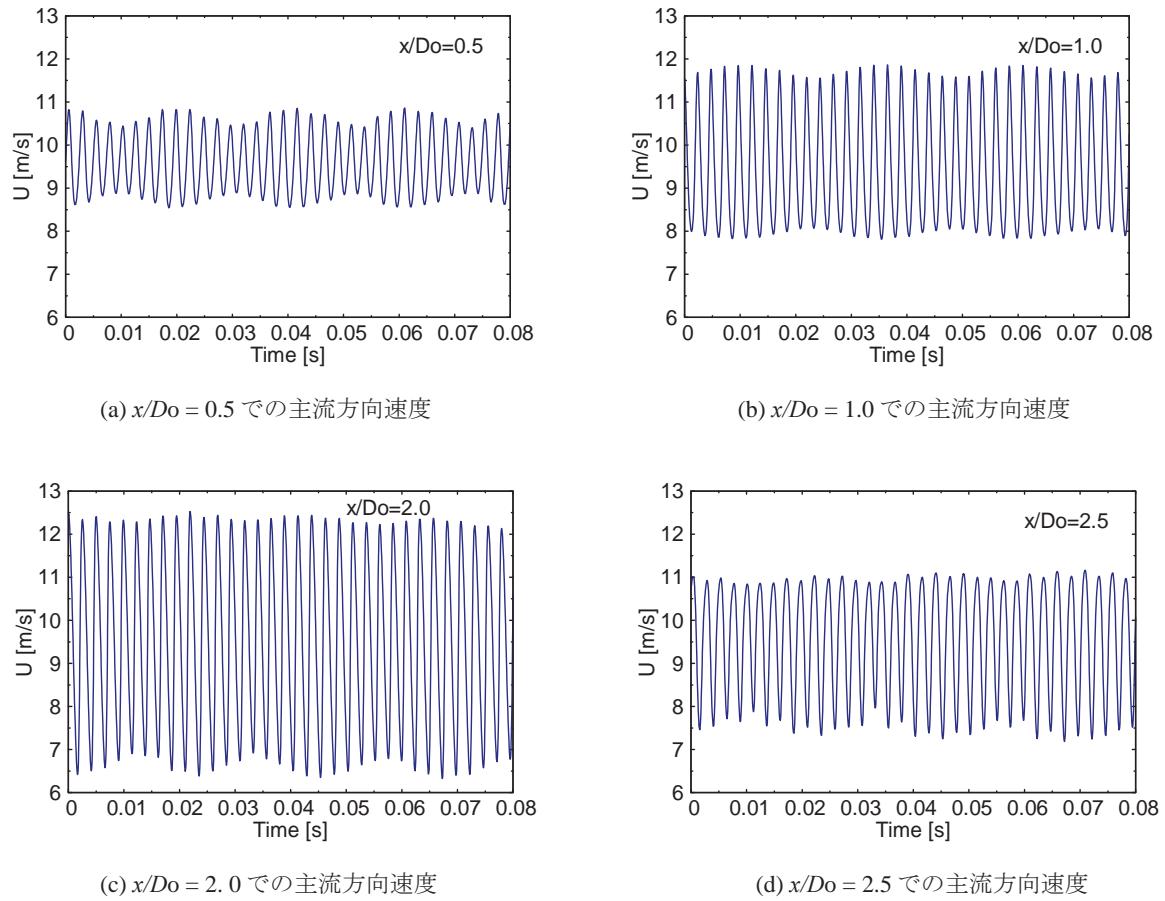
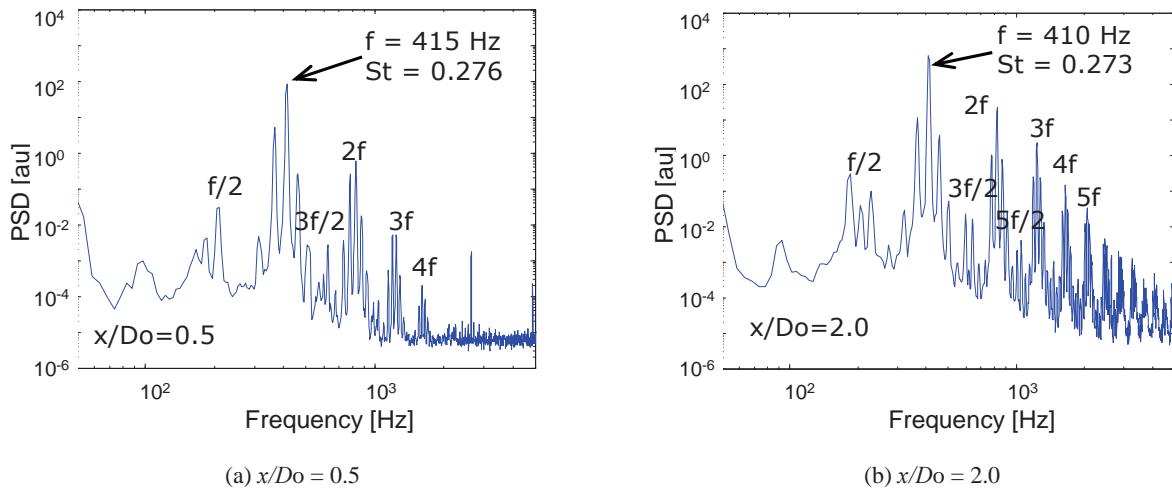


図5 PIVにより測定されたヘリウムガス噴流の温度場と中心軸上の速度 ($R_d = 500$)

図 6 熱膜流速計により測定されたヘリウムガス噴流中心軸上での速度の時間変化 ($Re = 500$)図 7 熱膜流速計により測定されたヘリウムガス噴流中心軸上での速度変動のパワースペクトル ($Re = 500$)